

INTEGRANDO AGUA, NITRÓGENO Y SALINIDAD EN SISTEMAS DE REGADÍO: CULTIVOS CUBIERTA FRENTE A BARBECHO

J.L. Gabriel^{1*} y M. Quemada^{1*}

¹ Dpto. de Producción Agraria, ETSI. Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Complutense s/n, 28040 Madrid. e-mail: miguel.quemada@upm.es, web: <http://www1.etsia.upm.es/GRUPOSINV/AgSystems/principal.htm>

RESUMEN. Los cultivos cubierta (CC) son eficientes para reducir el lixiviado de nitratos, evitar la erosión o mejorar las propiedades de los suelos. Pero hay pocos estudios que evalúen el impacto total, y es necesario asegurar que las ventajas no se compensen con las desventajas que puedan surgir, como la salinización. Buscando una mejor comprensión de estos procesos complejos, en este estudio se analizaron las dinámicas del agua, nitrógeno y sales en un monocultivo de maíz, intercalado con CC, mediante una doble aproximación con datos observados en campo y simulación con un modelo hidrológico. Los CC redujeron el lixiviado de nitratos sin incrementar la salinidad del suelo, reduciendo la salinidad en superficie en el momento de la siembra del maíz. Aunque los CC redujeron las pérdidas de sales brutas respecto al barbecho, no fue necesario aumentar el riego para favorecer el lixiviado de sales, reduciendo el riesgo de contaminación por nitratos.

ABSTRACT. Cover crops (CC) are efficient for reducing pollutant leaching, avoiding soil erosion or enhancing soil properties of agricultural soils. Yet few studies evaluate the overall impact of CC on agricultural ecosystem, and it is necessary to ensure that advantages of CC are not compensated by potential negative impacts such as soil salinization. For improving the understanding of these complex processes, we analyzed in this study water, nitrogen and salinity dynamics in a maize cropping systems, with CC (vetch, barley and fallow treatment) introduced in the intercropping season using both an experimental and modeling approach. As compared to a control treatment, CC reduced nitrate leaching without increasing soil salinity and reducing top layer salinity when maize was sown. And, although the CC reduced respect to fallow the net salt losses, in these conditions, excessive irrigation to favor salt leaching is not needed and will reduce deep water contamination risk with nitrate.

1.- Introducción

El uso de cultivos cubierta (CC) es una técnica eficiente para la reducción de la contaminación por nutrientes, evitar la erosión o mejorar propiedades de suelos agrícolas (Thorup-Kristensen *et al.* 2003), y su interés dentro de la comunidad científica se ha incrementado en los últimos años. Una búsqueda de artículos en la Web of Science con la palabras "cover crop" en el título, resumen o palabras clave da un total de unos 3000 trabajos desde los años 70, con más del 50% de

ellas desde 2006 y más del 25% desde 2010. La mayoría de ellos tratan con el efecto de esta técnica en una propiedad específica del suelo, pero muy pocos evalúan un impacto más global en los sistemas agrarios.

En general, reducen la erosión y la escorrentía, aumentan la infiltración y la capacidad de retención de agua. También pueden controlar las malas hierbas, las enfermedades e incluso reducir la salinidad. Incrementaron el contenido de materia orgánica y la fertilidad del suelo en muchas zonas del mundo, incluido en España (Peregrina *et al.* 2012), pero compitieron por el agua si no se mataban eliminaban antes de llegar a condiciones secas (Islam *et al.* 2006).

Los sistemas de agricultura intensiva, sin un manejo adecuado de agua y fertilizantes, pueden conducir a grandes pérdidas en forma gaseosa de óxidos nitrosos o como lixiviado de nitratos. Concretamente, el cultivo de maíz ha sido frecuentemente relacionado con la contaminación por nitratos (Díez *et al.* 1997; Causapé *et al.* 2004). Muchas de estas pérdidas se podrían controlar reduciendo el uso de agua durante el periodo de crecimiento del maíz, pero en las condiciones mediterráneas se ha demostrado que esta técnica incrementa el contenido de N residual en el suelo tras la cosecha, que se pierde fácilmente durante el posterior periodo de suelo desnudo (Sánchez-Martín *et al.* 2010; Gabriel *et al.* 2012b). En estos casos, cubrir ese suelo con un CC puede ser una técnica capaz de reducir las pérdidas por lixiviado (Thorup-Kristensen *et al.* 2003; Salmerón *et al.* 2010), pero también por las emisiones gaseosas. Además de mejorar la fertilidad, reduciendo la necesidad de fertilizantes para un mismo nivel de rendimiento (Gabriel *et al.* 2013).

El efecto de los CC en el lavado de nitratos se debe en gran medida al aumento de la evapotranspiración, produciendo un descenso del drenaje (Salmerón *et al.* 2010). Este aumento de la evapotranspiración se produce por el incremento de la transpiración, compensando ampliamente el descenso de la evaporación directa desde el suelo (Salado-Navarro y Sinclair 2009). Por tanto, la reducción del lixiviado de nitratos puede venir acompañado por un incremento del riesgo de salinización del suelo. De hecho, la salinización es una de las principales causas de la reducción de rendimientos y degradación de suelos de las regiones mediterráneas (Lambers 2003). La FAO informó que la salinización afecta a más de 80 millones de hectáreas de suelo agrícola y en torno al 10% de la superficie de regadío. La salinidad es un problema ambiental muy importante en sistemas

semiáridos, ha estado asociada a la histórica desaparición de civilizaciones antiguas como la mesopotámica, y continúa siendo un grave problema para la sostenibilidad de sistemas agrícolas en la actualidad como en las zonas del mar de Aral o el suroeste de Anatolia.

Una técnica común para evitar la salinidad es aplicar riego excesivo (Ayers y Wescott 1985), incrementando el lavado de solutos fuera del sistema (Oster 1994). Sin embargo, este lixiviado de sales conlleva el de nutrientes y agroquímicos, reduciendo la calidad de las masas de agua evacuadas y reduciendo la eficiencia de los fertilizantes (Díez *et al.* 2000).

Por tanto, es necesario considerar globalmente las técnicas de riego y CC para conocer mejor sus efectos combinados en los balances de agua, N y sales. Para ello se ha desarrollado un ensayo que evalúe a medio largo plazo el impacto dual de salinidad y lavado de nitratos basado en medidas de campo, pero también en modelos mecanísticos bien validados para comprobar que las ventajas de los CC no redundan en efectos negativos como la acumulación de sales.

2.- Material y Métodos

2.1.- Diseño experimental

El estudio tuvo lugar en una parcela en monocultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Aranjuez (Madrid, España) durante un periodo de 3.5 años (desde octubre de 2006 hasta abril de 2010) en un suelo franco arcillo limoso (Calcixerept típico) y con un clima Mediterráneo semiárido con alta variabilidad interanual.

Se distribuyeron al azar doce parcelas de 12x12 m² en tres tratamientos con cuatro repeticiones: cebada (*Hordeum vulgare* L., cv. Vanessa), veza (*Vicia villosa* L., cv. Vereda) y suelo desnudo. Los cultivos se sembraron a voleo, con una dosis de siembra de 180 y 150 kg ha⁻¹ de cebada y veza respectivamente, seguido de un pase de cultivador superficial (5 cm) a principios de octubre (5/10/2006, 11/10/2007, 9/10/2008 y 5/10/2009) y se mataron con una aplicación de glifosato al 2% a la salida del invierno (22/3/2007, 24/3/2008, 11/3/2009 y 15/3/2010), dejando el residuo seco en el suelo. Esto permitió desbrozar el residuo seco y realizar siembra directa de maíz en todo el ensayo a principio de abril, para cosecharlo a final de septiembre o principio de octubre. Durante el periodo del maíz se fertilizó el ensayo con 210 kg N ha⁻¹ de nitrato amónico en dos coberteras. La fertilización con fósforo y potasio, así como el resto de tratamientos fitosanitarios, fueron los tradicionales de la zona. Solo se aplicó riego durante el cultivo del maíz y se ajustó a la ET_c del cultivo, evitando en lo posible el drenaje durante este periodo. Se estimó la ET₀ con el método de Penman-Monteith. Para una descripción más detallada del diseño experimental se puede consultar Gabriel and Quemada (2011).

2.2.- Contenido y balance de agua del suelo

Para la medida de la humedad en el suelo se contó con 9 tubos de EnviroSCAN[®] (Sentek Pty Ltd, Australia)

distribuidos en tres de las repeticiones de cada uno de los tres tratamientos. Cada tubo constó de 7 siete sensores situados cada 20 cm desde 10 cm de profundidad hasta 130 cm. Los sensores fueron calibrados (Gabriel *et al.* 2010) y tomaron lecturas horarias en campo durante todo el tiempo que duró el ensayo. Para el balance de agua se analizaron medias diarias de los sensores de 0-20 (10), 20-40 (30), 40-80 (60), 80-120 (100) y 120-140 (130).

Para el cálculo del balance de agua se calibró el modelo de movimiento de agua en el suelo WAVE (Vanclooster *et al.* 1996) con datos del primer ciclo de suelo desnudo (2006/07) mediante una calibración inversa de los parámetros hídricos del suelo comparando los valores de contenido de agua en el suelo simulados frente a los observados en los sensores. El modelo de retención de agua empleado fue el de van Genuchten sin histéresis (van Genuchten, 1980) y el de conductividad de flujo de agua el de Mualem (Mualem, 1976). Los parámetros hídricos optimizados se basaron en medidas de campo. Para una mejor descripción del modelo o del proceso de calibración inversa se puede consultar Gabriel *et al.* (2012b) y Gabriel *et al.* (2014). Una vez calibrado y validado el modelo con el contenido de agua en el suelo, se aplicó al periodo de 3.5 años estudiado para obtener el balance de agua completo. De esta forma se obtuvo el volumen de agua percolado por debajo de 1.2 m de profundidad para cada tratamiento.

2.3.- Acumulación de sal y nitratos y su lavado

Para la medida del contenido de nitrógeno mineral (N_{min}) y sales en el perfil se tomaron muestras de suelo en intervalos de 0.2 m desde 0 hasta 1.2 m de profundidad dos veces al año, antes de sembrar el maíz y los CC. Cada muestra fue resultado de la combinación de 4 puntos de muestreo para cada parcela. El muestreo se llevó a cabo con una barrena helicoidal de Eijkelkamp[®]. Las muestras se conservaron cerradas y refrigeradas hasta su análisis.

La determinación de N_{min} se hizo mediante extracción en KCl 1 M durante las 72 horas posteriores al muestreo. El extracto se congeló y se le midió el contenido de N-NH₄⁺ y NO₃⁻ (Gabriel *et al.* 2012b). La concentración de solutos en la solución del suelo, se estimó con la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CE) de cada muestra y profundidad con un conductímetro Crison 525 (Crison, Barcelona, Spain; Gabriel *et al.* 2012a). Basado en los resultados de Gabriel *et al.* (2012a) se relacionó la CE con el contenido total de sales disueltas (SDT) en g L⁻¹, y después en Mg ha⁻¹, considerando la densidad aparente y el grosor del horizonte.

Para la medida de la concentración de amonio y nitratos en el lixiviado se contó con 36 cañas de succión de cápsula cerámica porosa (3 cañas en cada parcela) a 1.2 m de profundidad. A estas cañas se les aplicó vacío hasta una tensión próxima a 333 cm de agua y se dejaron en campo durante todo el ensayo, recogiendo muestra y aplicando la tensión de nuevo cada 15 días o después de un episodio de lluvia mayor de 20 mm (Gabriel *et al.* 2012b). Las muestras de solución se congelaron hasta su análisis. A

estas muestras se le unieron 24 muestras de agua de riego. Tanto el N_{min} como la CE se analizaron directamente sobre las muestras descongeladas. Los solutos introducidos con el agua de lluvia se obtuvieron basados en los resultados de Hontoria *et al.* (2003), que considera la CE del agua de lluvia en la zona como 0.0035 S m^{-1} . Basado en la alta permeabilidad de los horizontes profundos del suelo, se supuso que el agua lixiviada a 1.2 m alcanzó el nivel freático (estable a 4.5 m).

Para la estimación de los nitratos y de los solutos lixiviados se multiplicó el volumen de drenaje obtenido con el modelo por la concentración media correspondiente en la solución de las cañas de succión para cada tratamiento.

2.4.- Análisis estadístico

Para cada variable se realizó un análisis de la varianza (ANOVA). Las medias se separaron por el método Duncan y las diferencias significativas se evaluaron para $P \leq 0.05$. Para la correlación entre variables se usó el coeficiente de Pearson (r), capaz de medir la fuerza y dirección de la correlación lineal entre dos variables.

3.- Resultados

3.1.- Contenido y balance de agua del suelo

Las principales diferencias en el contenido de agua de los distintos tratamientos se dieron principalmente en los horizontes superficiales y fueron más importantes durante el periodo intercultivo (Fig. 1 y 2), reduciendo los CC el contenido de agua la mayor parte de los años. En el momento del matado de los CC el tratamiento de barbecho presentó mayor contenido de agua en los 40 cm superficiales (y especialmente en los 20 primeros cm) que la cebada, con la veza entre medias. Estas diferencias se mantuvieron hasta la siembra del maíz, e incluso en 2008 y 2010 se mantuvieron hasta la cosecha (Fig. 1). Al mismo tiempo, no hubo diferencias entre tratamientos o periodos por debajo de 0.8 m, manteniéndose siempre próximo a capacidad de campo. Y el contenido en el horizonte intermedio (de 40 a 80 cm) presentó las mayores diferencias entre tratamientos. Después de matar los CC en 2007, el barbecho tenía más agua que la cebada, con la veza de nuevo entre medias. En 2008, otra vez al matar los CC, la veza mostró mayor contenido que el barbecho y la cebada. En 2009, hubo un incremento permanente en los tratamientos con CC respecto al barbecho (Fig. 1 y 2) aunque no se observó ascenso capilar en el modelo. En cuanto al contenido total del perfil (desde 0 a 1.4 m de profundidad) las mayores diferencias se observaron de nuevo en el momento del matado de los CC y se suele conservar hasta la siembra del maíz, mientras que en el momento de la cosecha no se observan diferencias (excepto en 2007). El contenido de agua en el barbecho fue mayor que en los tratamientos de CC después de matarlos hasta que se sembró el maíz en 2007, debido al incremento en los horizontes intermedios. Pero esta tendencia se cambió en 2008, cuando el contenido total en la veza fue mayor que en

la cebada, con el barbecho entre medias. Y en 2009 y 2010 está tendencia a favor de los CC se incrementó, siendo en este caso ya la cebada el tratamiento que conservó más agua. Las diferencias con respecto al tratamiento de barbecho fueron entonces siempre menores de 60 mm y, menos en 2007; menores del 10% del contenido total. En los 40 cm superficiales, esta diferencia se quedó en 12 mm de media respecto a los tratamientos de CC, representando un 20% de diferencia. Y en el caso concreto de los primeros 20 cm la diferencia fue de media de 14 mm y 11 mm respecto a cebada y veza, representando el 33 y el 25% respectivamente. Sin embargo, en años como 2008, el descenso en el contenido de agua puede suponer el 50% en el momento del matado del CC.

Los CC incrementaron la ET_c durante el periodo intercultivo comparado con el barbecho (Tabla 1), aunque no hubo diferencias en la extracción durante el periodo de maíz. Sin embargo, la ET_c durante el cultivo del maíz no fue constante, variando entre 260 y 279 mm durante los primeros 3 meses y entre 311 y 423 mm en los segundos 3 meses. Durante el periodo intercultivo la cebada extrajo más agua durante dos años, sin diferencias los otros dos. Entrando con más detalle, la cebada aumentó la ET_c durante los primeros 3 meses, mientras que en los 3 siguientes no hubo diferencias entre ambos.

En cuanto al drenaje obtenido con WAVE, hubo diferencias entre tratamientos, años y periodos (Tabla 1). Durante los 3.5 años de estudio, el drenaje a 1.2 m fue de 614 mm en el tratamiento de barbecho, 270 mm mayor que en la cebada y 150 mm mayor que en la veza. La mayor parte de este volumen apreció durante los periodos intercultivo (en torno al 80%), sin muchas diferencias entre los primeros 3 meses del periodo y los segundos. Sin embargo, como el riego estuvo ajustado a la ET_c , en los casos en los que hubo drenaje durante los periodos de maíz, siempre se produjo durante los primeros 3 meses. Y, durante estos tres meses, el tratamiento de cebada redujo en un 40% el drenaje respecto al de barbecho. Durante el mismo periodo, el tratamiento de veza también redujo el drenaje entre un 20 y un 25% respecto al barbecho.

3.2.- Concentración de nitrato y sal en cañas de succión

Durante todo el periodo estudiado, las cañas de succión mantuvieron su capacidad de succión durante los 15 días entre muestreos, recuperando agua durante los mismos periodos que el modelo predijo drenaje (Fig. 3; Gabriel *et al.* 2012b). Los periodos de drenaje fueron más frecuentes en el tratamiento de barbecho (43 de los 81 muestreados) que en la veza (37) o la cebada (29). De este modo, los periodos con drenaje fueron de 602 días para el barbecho, 497 para la veza y 401 para la cebada (629, 515 y 422 estimados respectivamente por WAVE).

La correlación entre la CE y la concentración de NO_3^- en la solución de las cañas fue baja (Fig. 4). Aunque la concentración de NO_3^- presentó variabilidad a lo largo del estudio así como diferencias entre tratamientos, no hubo diferencias claras o tendencias entre los tratamientos para

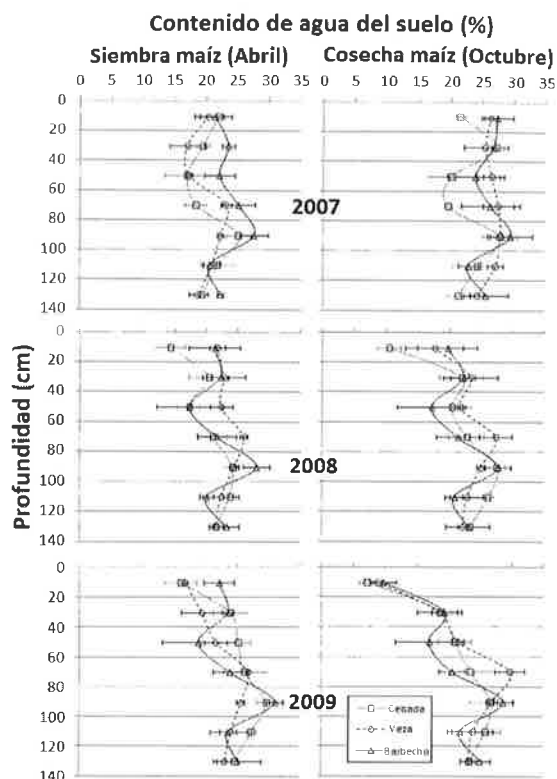


Fig. 1. Contenido de agua del suelo medido en 3 tratamientos al comienzo y al final del periodo con maíz.

Tabla 1. Balance de agua (entradas (lluvia más riego), evapotranspiración y drenaje obtenido con WAVE.) para los tres tratamientos, durante los 3.5 años de estudio.

	Input (mm)	ETc (mm)			Drenaje (mm)		
		Cb	Vz	SD	Cb	Vz	SD
05/10/2006-05/01/2007	152	53a	53a	40b	37c	50b	70a
06/01/2007-16/04/2007	97	116a	111a	44b	10b	10b	36a
17/04/2007-17/07/2007	315	277	277	277	48c	58b	76a
18/07/2007-07/10/2007	434	311	311	311	0	0	0
08/10/2007-08/01/2008	23	33a	15b	10b	0	0	0
09/01/2008-14/04/2008	77	44b	64a	41b	0	0	0
15/04/2008-15/07/2008	356	279	279	279	0b	34a	23a
16/07/2008-06/10/2008	368	390	390	390	0	0	0
07/10/2008-07/01/2009	166	37	40	36	21b	27b	81a
08/01/2009-01/04/2009	80	55a	53a	31b	41b	38b	51a
02/04/2009-02/07/2009	265	260	260	260	40ab	33b	50a
03/07/2009-29/09/2009	422	423	423	423	0b	3a	1ab
30/09/2009-20/12/2009	211	60a	39b	31c	7b	52a	50a
31/12/2009-31/03/2010	232	52b	63a	52b	200c	220b	239a

Los tratamientos son cebada (Cb), veza (Vz) y barbecho (SD) durante el periodo entre maíces. Para el mismo periodo, los tratamientos seguidos por letras distintas son diferentes significativamente para $\alpha < 0.05$.

la CE (Tabla 2). La CE media fue de 0.53 S m^{-1} ($\text{CV}=28\%$) para el tratamiento de barbecho, 0.56 ($\text{CV}=55\%$) para la veza y 0.52 ($\text{CV}=37\%$) para la cebada. Sin embargo la concentración de NO_3^- fue más baja en la cebada ($30 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$, $\text{CV}=0.92\%$) que en el resto de tratamientos. La concentración de la cebada se mantuvo constante en torno a los $24 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$, excepto en las primeras fases del ensayo donde rondó los $100 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$. La concentración media en el barbecho fue de $44 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ ($\text{CV}=55\%$) y de 57 ($\text{CV}=35\%$) en la veza, ambos fluctuando entre 140 y 20 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$. Por su lado, el agua de riego mantuvo un nivel bajo de CE y de NO_3^- (0.12)

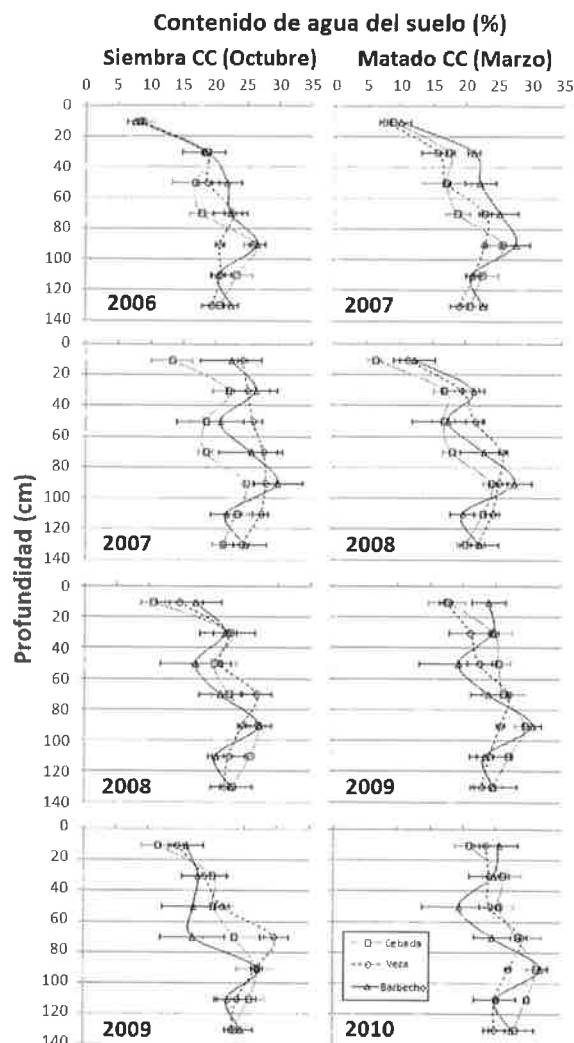


Fig. 2. Contenido de agua del suelo medido en 3 tratamientos al comienzo y al final del periodo con cultivos captura.

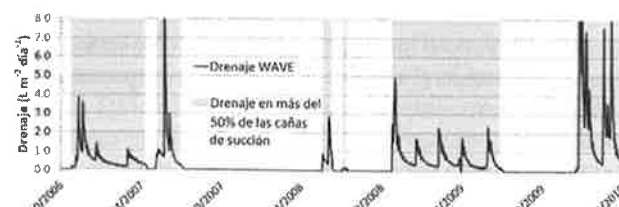


Fig. 3. Cantidad de drenaje simulado diariamente por el modelo WAVE a 1.2 m comparado con los periodos con extracto en al menos el 50% de las cañas de succión en el tratamiento de barbecho.

S m^{-1} , $0.3 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$) con pequeñas fluctuaciones a lo largo del ensayo, por lo que no fue la causa de las diferencias observadas.

3.3.- Lavado de sales y nitrato

Del total de las sales y el NO_3^- total lixiviados tuvo lugar durante el periodo intercultivo del maíz, representando el 80% del NO_3^- y el 85% de las sales en todos los tratamientos (Fig. 5, Tabla 3). Este lixiviado estuvo muy influenciado por la variable drenaje ($r=0.93$ para el nitrato y 0.99 para las sales). Este drenaje a su vez, dependió de

Tabla 2. Media y desviación típica de la concentración de nitrato y la conductividad eléctrica en la solución del suelo obtenida de cañas de succión para tres tratamientos durante 3.5 años.

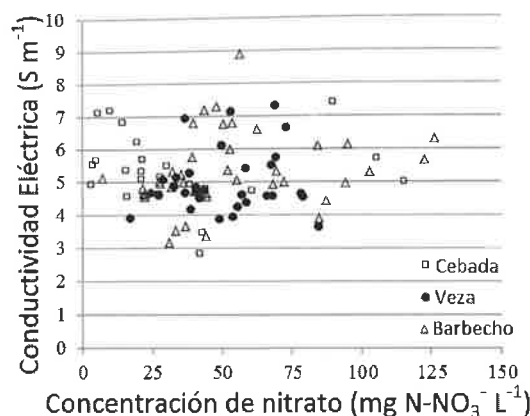
	mg N-NO ₃ ⁻ L ⁻¹			S m ⁻¹		
	Cb	Vz	SD	Cb	Vz	SD
05/10/2006-05/01/2007	104±6.4	54±0.4	76±8.8	5.7±0.41	4.1±0.21	4.5±0.37
06/01/2007-16/04/2007	25±6.1	67±3.0	100±3.7	5.2±0.68	4.6±0.02	5.5±0.11
17/04/2007-17/07/2007	32±8.0	57±5.7	66±6.6	4.9±0.10	5.5±0.09	5.6±0.43
18/07/2007-07/10/2007	-	-	-	-	-	-
08/10/2007-08/01/2008	-	-	-	-	-	-
09/01/2008-14/04/2008	-	-	-	-	-	-
15/04/2008-15/07/2008	-	22±7.3	21±4.0	-	4.3±0.49	5.2±0.59
16/07/2008-06/10/2008	-	-	-	-	-	-
07/10/2008-07/01/2009	15	33±4.3	33±2.5	5.3	4.7±0.16	4.9±0.10
08/01/2009-01/04/2009	22±0.9	38±1.8	34±1.2	4.9±0.07	4.6±0.07	4.5±0.19
02/04/2009-02/07/2009	32±5.8	42±3.2	43±3.8	4.7±0.44	4.7±0.13	4.8±0.11
03/07/2009-29/09/2009	-	63±6.5	59	-	4.5±0.14	5.5
30/09/2009-20/12/2009	-	31	56	-	4.8	8.9
31/12/2009-31/03/2010	16±2.9	58±2.8	48±1.1	6.1±0.28	6.7±0.12	6.8±0.09

Los tratamientos son cebada (Cb), veza (VZ) y barbecho (SD) entre maíz.

la precipitación ($r=0.86$ durante todo el estudio y 0.5 durante los periodos de CC). Durante los últimos tres meses del CC de 2010 ocurrió más del 40% del lixiviado de NO₃⁻ y más del 55% de las sales en los tratamientos con CC, mientras que en el mismo periodo el lixiviado de NO₃⁻ y solutos en el barbecho sólo representó el 34 y el 43% respectivamente. Durante el cultivo de maíz, sólo se produjo lixiviado durante los tres primeros meses, cuando la planta era pequeña.

Durante los periodos de CC, el contenido de agua inicial tuvo poca influencia en el drenaje ($r<0.31$ a todas las profundidades), en el lixiviado de solutos ($r<0.25$) y en el de nitratos ($r<0.40$), pero la humedad en los 80 primeros cm fue indicador del drenaje del periodo previo ($r=0.84$), de una elevada precipitación ($r=0.78$) y del lixiviado de sales y nitratos ($r=0.84$ y 0.70 respectivamente para los 80 cm superficiales y de 0.89 y 0.79 para los 40 cm superiores). La precipitación tuvo más influencia en el lixiviado de otros solutos que en el de nitratos ($r=0.93$ y 0.84 respectivamente), ya que la extracción de N por la planta también estuvo potenciada por la lluvia. La precipitación favoreció un aumento de la ETc ($r=0.76$) y, una parte significativa de esta ETc, se debió principalmente al aumento en la transpiración, que estuvo íntimamente ligada a la extracción de N por la planta ($r=0.90$).

Durante los periodos de maíz, ni la precipitación ni el riego tuvieron un efecto directo en el drenaje ($r=0.02$ y 0.11 respectivamente), ni la humedad inicial en cualquier profundidad tampoco ($r<0.52$). Sin embargo el drenaje sí disminuyó cuando la transpiración aumentó ($r=-0.72$) y estuvo muy relacionado con la humedad final del suelo en cosecha en los horizontes superficiales ($r=0.74$ para los primeros 20 cm y 0.68 para los 40). Durante este periodo, de nuevo hubo una elevada correlación entre el lixiviado de nitratos y sales con el drenaje ($r=0.92$ y 0.85 respectivamente) y, en este caso, el lixiviado de nitratos estuvo más correlacionado con la transpiración que con el de otros solutos ($r=-0.65$ frente a -0.50) porque implica un mayor crecimiento y una mayor extracción de N, dando lugar a menos NO₃⁻ disponible para su pérdida por lixiviado.

**Fig. 4.** Concentración de nitrato frente conductividad eléctrica en la solución del suelo obtenida en cañas de succión.**Tabla 3.** Pérdidas de nitrato y sales por lavado para los tres tratamientos.

	ETc (mm)			Drenaje (mm)		
	Cb	Vz	SD	Cb	Vz	SD
05/10/2006-05/01/2007	34b	28c	54a	1.7b	0.7c	2.2a
06/01/2007-16/04/2007	2c	7b	32a	0.2b	0.2b	0.9a
17/04/2007-17/07/2007	12c	30b	42a	1.7b	0.8c	2.5a
18/07/2007-07/10/2007	0	0	0	0.0	0.0	0.0
08/10/2007-08/01/2008	0	0	0	0.0	0.0	0.0
09/01/2008-14/04/2008	0	0	0	0.0	0.0	0.0
15/04/2008-15/07/2008	0b	6a	3ab	0.0b	0.9a	0.8a
16/07/2008-06/10/2008	0	0	0	0.0	0.0	0.0
07/10/2008-07/01/2009	3c	9b	27a	0.7b	0.6b	2.9a
08/01/2009-01/04/2009	9a	13ab	18a	1.7ab	1.4b	1.9a
02/04/2009-02/07/2009	14	19	22	0.9b	0.9b	1.6a
03/07/2009-29/09/2009	0	1	0	0.0	0.0	0.0
30/09/2009-20/12/2009	3c	17b	28a	0.0b	2.0a	2.1a
31/12/2009-31/03/2010	51b	112a	115a	9.3b	10.7ab	11.6a

Los tratamientos son cebada (Cb), veza (VZ) y barbecho (SD) entre periodos de maíz. Para el mismo periodo, los tratamientos seguidos por letras distintas son diferentes significativamente para $\alpha<0.05$.

3.4.- Acumulación de N_{min} y sales en el perfil

Después de 4 periodos de CC y de 3 de maíz, el tratamiento de veza fue el que presentó un mayor contenido de N_{min} en el perfil, especialmente en los primeros 40 cm, aunque en el barbecho se acumularon más solutos (Fig. 6). Por tanto, el efecto de los CC en la acumulación de N fue distinto del efecto en la acumulación de sales y en su distribución. Durante todo el experimento (Fig. 6 y 7), la presencia de agua y de sales estuvo fuertemente ligada, principalmente en los horizontes medios y profundos, con r rondando desde 0.59 a 0.66 . Sin embargo, el nitrato del suelo fue menos dependiente del contenido de agua (r entre 0.42 y 0.58 para los mismos horizontes) y con una relación aún menor en las capas superficiales. Del mismo modo, la relación entre el contenido de sal y de N_{min} sólo fue significativo en dos muestreos concretos.

Durante los periodos de CC, el lixiviado de sales estuvo muy influido por el valor inicial de la salinidad. Esta correlación se incrementó con la profundidad ($r=0.97$ cuando se consideraron los últimos 40 cm, 0.95 para los 40 cm intermedios y 0.81 para los 40 superficiales). El contenido inicial de N_{min} tuvo menos influencia en el

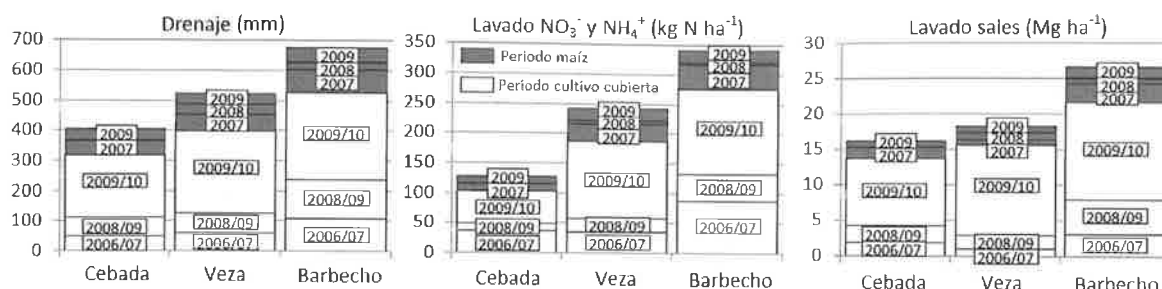


Fig. 5. Drenaje y lixiviación de N_{min} y solutos en los tres tratamientos.

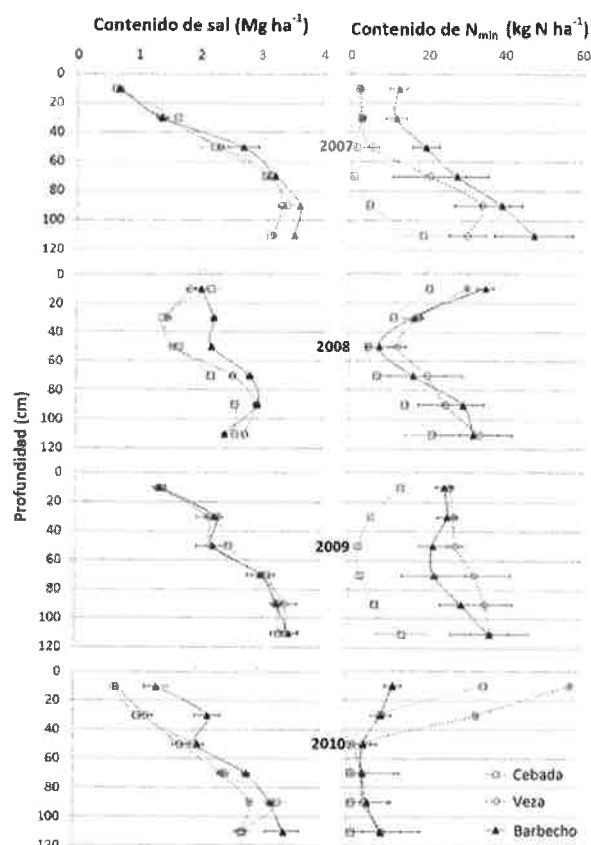


Fig. 6. Distribución del N_{min} del suelo y del contenido de sales por profundidades y tratamientos entre el matado del cultivo captura y la siembra del maíz.

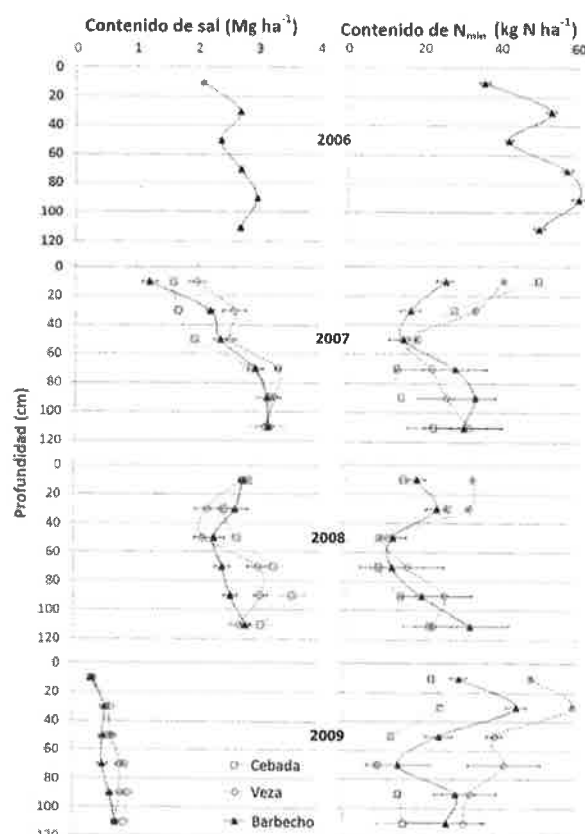


Fig. 7. Distribución del N_{min} del suelo y del contenido de sales por profundidades y tratamientos tras la cosecha del maíz.

lixiviado final de nitrato y la relación descendió con la profundidad ($r=0.16$ para los 40 cm inferiores, 0.31 para los intermedios y 0.47 para los superiores). El contenido inicial de agua tampoco tuvo influencia para sales o nitrato.

Durante los periodos de maíz, la relación entre el contenido inicial de sales en las capas superficiales y el drenaje fue significativo y negativo ($r=-0.88$ para el contenido en los 20 cm superficiales, -0.72 para los 40, 0.83 para los 40 intermedios y 0.86 para los 40 inferiores). Esta relación se debe al crecimiento de la planta, ya que al aumentar con el contenido de nitrato inicial aumentaba la transpiración en las capas superficiales ($r=0.82$ en los 20 cm superficiales y 0.78 en los 40). El contenido inicial de sales y nitratos estuvo relacionado ($r=0.80$ en los 20 cm superficiales). Por tanto, la transpiración estuvo relacionada con el contenido inicial de sales ($r=0.88$ para los 20 cm superficiales y 0.95 para los 40).

4.- Discusión

Remplazar el barbecho por CC en sistemas de regadío modificó el balance de agua y el lavado de solutos. En regiones mediterráneas y semiáridas, el uso de CC está frecuentemente limitado por su competencia con el cultivo principal por nutrientes y agua (Salmerón *et al.* 2010). En este estudio se observaron diferencias en el contenido de agua durante el periodo intercultivo, que fueron mayores en los horizontes superficiales, debidas a la producción de biomasa y de la transpiración asociada. La cebada presentó mayor ET_c durante los primeros 3 meses de cultivo, por su rápido establecimiento (Gabriel and Quemada 2011). Esto redujo el contenido de agua respecto al barbecho, con la veza intermedia. Aunque estas diferencias en algunos momentos fueron cercanas al 50% en el momento del matado de los CC, el periodo de 4

semanas entre el matado y la siembra del maíz fue suficiente para reducirlas. El principal motivo fueron las lluvias primaverales y la reducción de la evaporación directa por el acolchado generado por el residuo. No hubo diferencias por debajo de 80 cm, por ser la extracción a esta profundidad despreciable. Sin embargo, la evolución del contenido de agua en el horizonte intermedio presentó un incremento permanente en la capacidad de retención en los tratamientos con CC. Este incremento se mostró más rápido en la veza que en la cebada, y está en sintonía con los resultados obtenidos por Muñoz-Carpena *et al.* (2008), que también detectaron un incremento en la capacidad de retención de agua tras CC. Este incremento en la capacidad de retención mitigó las diferencias en el perfil completo respecto al barbecho, que en este caso siempre fueron inferiores a 60 mm, y similares a los 80 mm que observaron McGuire *et al.* (1998) en California. Sólo en 2007 (el primer año de estudio) el descenso fue superior al 10% del agua total. Esto muestra que aunque hay competencia por agua con el cultivo principal, es fácilmente solucionable incrementando ligeramente el riego inicial del cultivo principal. Como el lixiviado de nitratos en las fases iniciales del cultivo principal, cuando el suelo está húmedo después del invierno combinado con los riegos frecuentes para asegurar la implantación (Vázquez *et al.* 2005), esté descenso en el contenido de agua permite reducir el drenaje y el riesgo de lavado consecuente.

Combinando los datos de humedad con datos de cañas de succión se obtuvo que los CC redujeron la cantidad de drenaje así como la duración de los periodos, siendo unos 100 días más cortos en la veza y unos 200 en la cebada. La concentración de sales y nitratos en las cañas no siguieron el mismo patrón a lo largo del estudio. Mientras que no hubo diferencias en la CE entre tratamientos o en el tiempo, la concentración de nitrato se mostró más variable. En general, la concentración en la cebada fue más baja que en el resto y, como la concentración de sal y nitrato en el agua de riego fue siempre constante y baja, no se puede considerar la causa de la variabilidad. En este caso la concentración de nitrato se debe a la acumulación de nitrato en el perfil en los tratamientos de barbecho y veza, lavado ocasionalmente en periodos de lluvia. Estos ciclos de acumulación/lixiviado también fueron observados en regiones mediterráneas por Ruiz-Ramos *et al.* (2011). Sin embargo, la concentración de sales estuvo más controlada por la humedad que fue capaz de modificar el equilibrio de sales. En los horizontes profundos, la humedad fue estable, de ahí la escasa variación temporal. Además, el subsuelo de la ribera del Tajo es moderadamente rico en minerales de baja solubilidad (yeso, carbonatos y cloruro sódico) que fueron lentamente disueltos en los horizontes profundos sin ser influidos por los CC.

El lixiviado de sales y nitrato mostró resultados paralelos para la cebada y el barbecho, por la influencia directa del drenaje. La cebada redujo el lixiviado de sales y de nitrato considerablemente por la reducción del drenaje y de N_{min} disponible en el suelo. Pero para la veza los patrones fueron algo distintos. Aunque el lavado de sales se comportó de manera parecida en los dos CC, marcado por el drenaje, el

lixiviado de nitratos fue mayor en la veza, debido a la introducción de N en el sistema por la fijación de N_2 atmosférico. En cualquier caso, tanto el lixiviado de sal como de nitrato se produjo principalmente durante el periodo de CC en los años de mayor precipitación, pero dependiendo de la variabilidad meteorológica propia del clima mediterráneo. Esto también fue observado por Caballero *et al.* (2001) y Sánchez-Martín *et al.* (2010), que mostraron que en los sistemas de regadío la mayor parte del lixiviado tenía lugar durante los periodos sin cultivo si el volumen de riego estaba ajustado a la demanda. Esto también apoya que el lixiviado esté muy relacionado con la precipitación, y más en el caso de las sales que el de nitrato, con mayor influencia del desarrollo de la planta, mayor también con mayor precipitación. Y en la misma línea se observa la relación inversa durante el periodo de maíz entre el lixiviado de nitrato y el rendimiento del maíz, mayor que la relación con el lavado de sales, y que tiene como explicación el incremento de la transpiración (con el consecuente descenso del drenaje) y la mayor absorción de N por la planta al incrementar el tamaño. Sin embargo, durante los primeros meses del maíz, el riesgo de lixiviado de nitratos es alto por haber mayor disponibilidad de agua y N de la que realmente absorbe el cultivo (Vázquez *et al.* 2005). Por eso, las técnicas que permiten disminuir el contenido de agua y N_{min} en el suelo en primavera (favoreciendo la retención del N en formas no móviles) son una pieza clave para el control del lavado (Salmerón *et al.* 2010). En este caso, la humedad inicial del suelo en la siembra del maíz tuvo gran influencia en el drenaje de los distintos tratamientos, aunque entre años esta relación quedó enmascarada por la variabilidad climática. Por otro lado, el contenido final de agua en el suelo mostró ser un buen indicador del lixiviado de sales y nitrato durante el cultivo de maíz.

Al comienzo del ensayo, el contenido de nitrato y sales previo a la siembra del CC fue similar para todos los tratamientos y profundidades. Sin embargo, tras 4 ciclos de CC y 3 de maíz el contenido de N_{min} fue distinto para los 3 tratamientos, mientras que el contenido de sales permaneció similar. La cebada redujo el contenido de nitrato en el perfil que el barbecho, con la veza entre medias gracias a su capacidad de fijación de N_2 . Sin embargo estas diferencias tendieron a reducirse durante el cultivo del maíz, gracias a la mineralización de los residuos de los CC y al menor lavado de nitrato primaveral. En general, los tratamientos de CC acumularon mayor cantidad de nitrato en horizontes superficiales, mostrando su capacidad de recircular los nutrientes y evitar pérdidas (Thorup-Kristensen *et al.* 2003). Pero por otro lado, tendieron a acumular sales por lavarse menos. Sin embargo, y con dinámica contraria a la del nitrato, en el momento de la siembra del maíz hubo un descenso en la salinidad en superficie algunos años, principalmente por la presencia de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) disuelto en el barbecho por el mayor contenido de agua durante largos periodos (Gabriel *et al.* 2012a), generando mejores condiciones para la germinación del maíz.

La acumulación de sal en el perfil pudo conducir a

limitaciones importantes del cultivo y al deterioro de la estructura del suelo. Aunque no se han observado diferencias entre tratamientos en rendimiento (Gabriel and Quemada 2011), es importante tener cuidado para evitar que se produzcan. En estas condiciones no parece recomendable la aplicación de fracción de lixiviado durante el verano, ya que las lluvias otoñales son suficientes para evitar la acumulación de sales, incluso en tratamientos de CC, sin reducir la eficiencia de uso del N. Además, se podría favorecer el lavado de otros agroquímicos, con efectos indeseables. Sin embargo, en caso de que las aguas de riego fuesen de menor calidad la necesidad de la fracción de lixiviado podría ser mayor.

5.- Conclusiones

En este estudio se han analizado las dinámicas del agua, N y sales en un sistema de regadío de maíz con la introducción de CC en el periodo intercultivo. En comparación con el control, los CC redujeron el nitrato lixiviado (64% la cebada y 29% la veza) sin incrementar la salinidad. Además, los CC redujeron la salinidad en superficie en el momento de la siembra del maíz. El lixiviado total de sales durante los 3.5 años en el barbecho fue de 26 Mg ha⁻¹ y se redujo en un 31% con los CC. En estas condiciones no parece necesario el riego excesivo para lixiviar sales, reduciendo así el riesgo de desplazamiento de nitratos y otros solutos.

Agradecimientos. Este trabajo está financiado por CICYT (AGL 2014-52310-R) y Comunidad de Madrid (proyecto AGRISOST II, S2013/ABI-2717). Agradecer al personal de La Chimenea (IMIDRA) por su ayuda y asistencia.

6.- Bibliografía

- Ayers, R.D., y D.W. Wescott, 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrig. Drain. Paper 29, Rev. 1. FAO ed., Roma, Italia.
- Caballero, R., Bustos, A., and Román, R. (2001). "Soil salinity under traditional and improved irrigation schedules in central Spain." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 1210-1218.
- Causapé, J., D. Quílez, D., y R. Aragües, 2004. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level - II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows. *Agr. Water Manage.*, 70, 211-228.
- Díez, J.A., R. Roman, R. Caballero y A. Caballero, 1997. Nitrate leaching from soils under a maize-wheat-maize sequence, two irrigation schedules and three types of fertilisers. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 65, 189-199.
- Díez, J.A., R. Caballero, R. Román, A. Tarquis, MC. Cartagena y A. Vallejo, 2000. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in central Spain. *J. Environ. Qual.*, 29, 1539-1547.
- Gabriel, J.L., JI. Lizaso y M. Quemada, 2010. Laboratory versus field calibration of Capacitance Probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74, 593-601.
- Gabriel, J.L., y M. Quemada, 2011. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: Yield, N uptake and fertiliser fate. *Eur. J. Agron.*, 34, 133-143.
- Gabriel, J.L., P. Almendros, C. Hontoria y M. Quemada, 2012a. The role of cover crops in irrigated systems: Soil salinity and salt leaching. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 158, 200-207.
- Gabriel, J.L., R. Muñoz-Carpena y M. Quemada, 2012b. The role of cover crops in irrigated systems: water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 155, 50-61.
- Gabriel, J.L., A. Garrido y M. Quemada, 2013. Cover crops effect on farm benefits and nitrate leaching: Linking economic and environmental analysis. *Agr. Syst.* 121, 23-32.
- Gabriel, J.L., M. Vanclooster y M. Quemada, 2014. Integrating water, nitrogen and salinity management to increase sustainability of irrigated systems: cover cropping versus fallow. *J. Irrigation and Drainage Engineering* 140 (9), A4014002.
- Hontoria, C., A. Saa, J. Almorox, L. Cuadra, A. Sánchez y JM. Gascó, 2003. The chemical composition of precipitation in Madrid. *Water Air Soil Pollut.*, 146, 35-54.
- Islam, N., WW. Wallender, J. Mitchell, S. Wicks y RE Howitt, 2006. A comprehensive experimental study with mathematical modeling to investigate the effects of cropping practices on water balance variables. *Agric. Water Manage.*, 82, 129-147.
- Lambers, H. 2003. Dryland salinity: a key environmental issue in southern Australia. *Pl. Soil* 257, v-vii.
- McGuire, A.M., DC. Bryant y RF. Denison, 1998. Wheat yields nitrogen uptake, and soil moisture following winter legume cover crop vs. fallow. *Agron. J.*, 90, 404-410.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, 513-522.
- Muñoz-Carpena, R., A. Ritter, DD. Bosch, B. Schaffery TL. Potter, 2008. Summer cover crop impacts on soil percolation and nitrogen leaching from a winter corn field. *Agr. Water Manage.*, 95, 633-644.
- Oster, J.D., 1994. Irrigation with poor quality water. *Agr. Water Manage.*, 25, 271-297.
- Peregrina, F., EP. Pérez-Álvarez, M. Colina y E. García-Escudero, 2012. Cover crops and tillage influence soil organic matter and nitrogen availability in a semi-arid vineyard. *Arch. Agron. Soil Sci.*, 58, 95-102.
- Ruiz-Ramos, M., J.L. Gabriel, N. Vázquez y M. Quemada, 2011. Evaluation of nitrate leaching in a vulnerable zone: effect of irrigation water and organic manure application. *Span. J. Agric. Res.*, 3, 12-18.
- Salado-Navarro, L.R., y TR. Sinclair, 2009. Crop rotations in Argentina: analysis of water balance and yield using crop models. *Agr. Syst.*, 102, 11-16.
- Salmerón, M., J. Caverro, D. Quílez y R. Isla, 2010. Winter cover crops affect monoculture maize yield and nitrogen leaching under irrigated Mediterranean conditions. *Agron. J.*, 102, 33-42.
- Sánchez-Martín, L., A. Sanz-Cobena, A. Meijide, M. Quemada y A. Vallejo, 2010. The importance of the fallow period for N₂O and CH₄ fluxes and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated agroecosystem. *Eur. J. Soil Sci.*, 61, 710-720.
- Thorup-Kristensen, K., J. Magid y LS. Jensen, 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Adv. Agron.*, 79, 227-302.
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- Vanclooster, M., P. Viaene, J. Diels y K. Christiaens, 1996. WAVE: a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Reference and user's manual (Release 2.0), Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Vázquez, N., A. Pardo, ML. Suso y M. Quemada, 2005. A methodology for measuring drainage and nitrate leaching in unevenly irrigated vegetable crops. *Plant Soil*, 269, 297-308.